



Title	放射線の熱量的測定に関する研究 (5)
Author(s)	佐方, 周防
Citation	日本医学放射線学会雑誌. 1972, 32(7), p. 619-625
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/16159
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

放射線の熱量的測定に関する研究 (5)

(セシウム—137ガンマ線およびベータトロン電子線の吸収線量)

放射線医学総合研究所物理研究部（橋詰雅部長）

佐 方 周 防

(昭和47年7月24日受付)

Calorimetric measurement of ionizing radiation (5)

(Absorbed dose of Cs-137 gamma-rays and electrons from betatron)

by

Suoh Sakata

Physics division, National Institute of Radiological Sciences, Anagawa, Chiba-shi, Japan

Research Code No.: 203

Key Words: Calorimeter, Absorbed dose, Mass stopping power ratio, ¹³⁷Cs, Electron

A measurement of the ratio of absorbed dose in carbon calorimeter to ionization in a carbon ionization chamber exposed to Cs-137 gamma-rays and electron from betatron with the initial energy of 15 and 25 MeV is described. The calorimeter is of the twin isothermal type with thermistor as temperature sensitive element, and this is able to measure the local absorbed energy. The shape of chamber was designed to be similar to that of calorimeter so that the ionization at a point of carbon corresponds to the absorbed energy measured by calorimeter at the same point. With Cs-137 gamma-rays, the stopping power ratio of carbon to air was calculated to be 1.011 from the ratio of absorbed dose to ionization assuming that W = 33.73 per ion pair. The stopping power ratios for electrons at various depths in carbon were obtained using mean electron energies which were derived from Harder's formula. The agreement between experimental and theoretical values is reasonably good.

1. 緒 言

高エネルギー電離放射線による媒質中の効果を量的に判断するにはその中の局所に吸収されたエネルギーを知ることが望ましい。このエネルギーは吸収線量と呼ばれ rad単位で表わされるが、もしこの吸収エネルギーが完全に熱エネルギーに変換されるならば熱量計法は吸収線量の最も直接的な測定方法である。

近年、熱量計の実験技術はかなり進歩し⁷⁾⁸⁾,

吸収線量に関してもコバルト—60ガンマ線につき Petree and Lamperti¹⁴⁾ の報告、高エネルギーX線につき Bewley²⁾の報告がある。我々は放射線のエネルギー・フルーエンス測定に熱量計を用いてきた¹²⁾¹⁷⁾¹⁸⁾¹⁶⁾。ここではセシウム—137照射装置よりのガンマ線およびベータトロンから放射される電子線の吸収線量を、カーボン製の熱量計および電離箱で測定を行ない、相互の比を求めた。同様の測定は15MeVの電子線を用いた Bradshaw⁵⁾

の報告があるが、本研究では電子線のエネルギーおよび媒質中の深さを変えて熱量計と電離箱の吸収線量の比を求め、更にこの比より、空気のW値を用いてカーボンと空気の電子質量阻止能比を計算し理論値との比較を行なつたので報告する。

2. 热量計

2-1 材質および構造

熱量計用の材質としてはなるべく組織に等価なものが望ましいが、現在の炭化水素基をもつプラスチックは多かれ少なかれ放射線化学反応による吸熱反応が起り、又プラスチック成型の際封入される有機ガスその他の気体は放射線照射により発熱反応を生じ^{③⑥}、これらの反応熱の値については未だ実験的に正確に求められたデータが乏しい。放射線化学反応の少ないポリスチレン又は単原子物質であるカーボン（グラファイト=人造黒鉛）が、現在吸収線量計用として推奨されているが^⑪、熱伝導の良好な点を考慮し今回の熱量計はグラファイトを用いて製作した。

熱量計の外形構造を Fig. 1 に示す。熱量計の

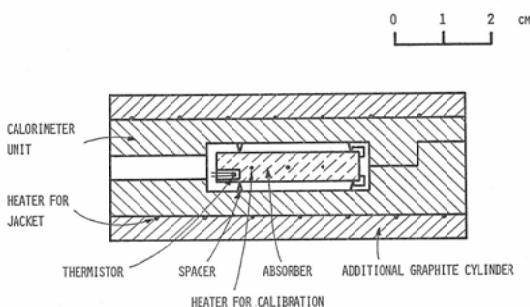


Fig. 1. Cross sectional view of carbon calorimeter.

1 ユニットは直径74mm ϕ 、長さ20mm の円筒で内部は直径34mm ϕ 、長さ10mmの中空状となつてゐる。この中空部には、吸収体が図のように3個の三弗化塩化エチレンのスペーサーで支えられており、媒質中の局所に吸収されたエネルギーが測定できる。吸収体は直径30mm ϕ 、厚さ3mmの円板を2枚接着したもので、接着面に0.04mm ϕ の銅ニッケル抵抗線 (323Ω/m) を挟み込み電熱エネルギーによる較正用ヒーターとした。その抵抗値は約11~14Ωである。温度検出用素子として円板の

Table 1. Composition of calorimeter absorber

Component	Weight(g)	Fraction
Graphite	7.0240	0.9963
Araldite	0.0077	0.0011
Heater and its leads	0.0092	0.0013
Thermistor and its leads	0.0092	0.0013
Total	7.0501	1.0000

一方にガラスピード型サーミスター（芝浦電子製作所製、25°Cにおける抵抗値は約 100KΩ）をアラルダイトで埋め込んである。吸収体は製作過程中に注意深く計量されており、各構成素子の重量および重量比の1例を Table 1 に示す。このユニットの前後には、Fig. 1 のように適当な厚さのグラファイト円板を、又他の熱量計ユニットをも三弗化塩化エチレン製のボルトで連結できる構造となつており、任意の数個所の深さにおける線量の同時測定が可能である。吸収体の外側を囲む部分は断熱ジャケットして働き各連結面には吸収体と同様に適当な長さの0.04mm ϕ 銅ニッケル抵抗線が挟み込んである。熱量計および後に述べる電離箱の材料として用いたグラファイトは原子炉の減速材料用のもので、灰分が0.002%以下、ボロンの含有率が0.1ppm 以下および比重が1.70g/cm³である。灰分はカルシウム、バナジウムおよびチタンが主成分であるが、極めて微量なのでその影響は無視できる。

2-2 吸収体の温度測定

同じ熱量計を6個製作し最高3個を連結して放射線測定用に用い、他の3個も同様に連結して放射線測定用に対するコントロールとした。この方法により同時に3カ所の深さの線量を測定でき誤差を軽減できる。温度測定は放射線測定用およびコントロール用の吸収体中のサーミスターおよびこれと同程度の抵抗値を持つ2個の固定抵抗とでブリッジを形成し、このブリッジの不平衡電圧を直流アンプで検出、増幅してチャート・レコーダー上に現示することにより行なつた。測定の原理および実験方法の詳細は既報^{⑫⑬}を参照されたい。

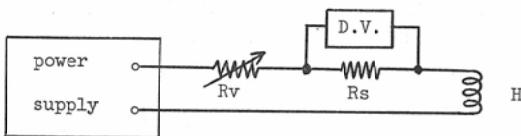


Fig. 2. Electrical calibration circuit of calorimeter. Power supply, mercury cell; R_v, variable resistor; R_s, standard resistor; D.V., differential voltmeter; H, heater of absorber.

2-3 電気エネルギーによる熱量計の較正

Fig. 2 の回路により吸収体のヒーターに電流を流し、電気エネルギーにより熱量計の感度を較正した。加えたエネルギーは吸収体に埋め込んだヒーターの抵抗値と標準抵抗 (25°Cにおける抵抗値 = $100.001\Omega \pm 0.005\%$) の両端の電圧降下を differential voltmeter で求めた値より得る電流値より計算できる。differential voltmeter は John Flnke 製の model 801 B で 5 ケタ迄読み取ることができるものである。3 対の熱量計を較正してレコーダー・チャート上の 1 目盛 (フルスケール = 100 目盛) あたり $4.20, 4.26$ および 4.68×10^8 ergs の値を得た。これは約 6 rads/目盛の感度となるが、測定誤差をやや犠牲にすればこの感度は 5 倍程度迄上昇し得る。測定する線量は約 $50 \sim 500$ rads であるので吸収体の温度上昇は最大 0.08°C 程度となる。熱量計の較正もほぼこのレベルで行なうが、ヒーターに用いた銅ニッケル抵抗線の規格は A 級でその温度係数が $2 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 以下であるから、較正中の抵抗変化は 0.0002% 以下で無視できる。

2-4 断熱ジャケットのエネルギーの供給

吸収体とそれを取囲むジャケットの温度が等しければ、この系は断熱状態になり吸収体よりのエネルギー損失はない。しかし実際はジャケットの熱損失ならびに吸収体のサーミスターおよびヒーターのリード線からの熱損失があり、理想的な断熱状態は実現が困難である。この熱損失は、レコーダーのチャート上に一定時定数で減衰する指數関数曲線として現われるが、今回の熱量計の時定数は約 40 分で実際の測定時間 (6 ~ 10 分) に較べ

てかなり長く、放熱曲線はほとんど直線となる。それ故、吸収体にエネルギーを加える前後の直線の外挿によつて真のエネルギー吸収を得ることができる。このことより較正の際の断熱ジャケットのエネルギー供給は、吸収体と断熱ジャケットの重さの比および埋め込んだヒーターの抵抗値より単位質量あたり双方へ等しいエネルギーが加わるよう印加電圧を調節するのみで充分であつた。

3. 電離箱

電離箱の外形、構造を Fig. 3 に示す。これは

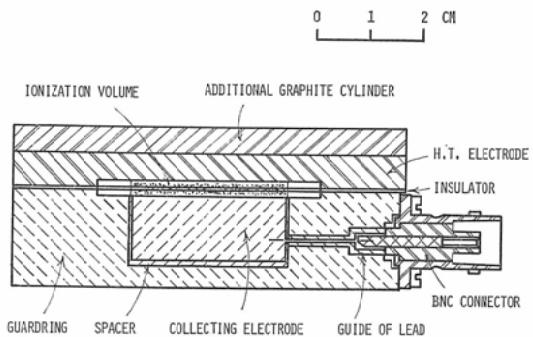


Fig. 3. Cross sectional view of carbon chamber.

平行平板型電離箱で、外径および有効電離体積の断面積はそれぞれ熱量計の外径および吸収体の直径と同じである。電離箱も熱量計と同様にその前後に適当な厚さのグラファイト円板又は熱量計ユニットを連結できるようになっており、熱量計の吸収体と同位置の電離が測定可能となつて いる。有効電離体積は各寸法の測定の結果 $1.910 \pm 0.010\text{cc}$ であつた。

電離箱よりの電離電流の測定は零位法を用いた⁴⁾。検出器はタケダ理研製の T R 84 B 型振動容量電位計を、集電用コンデンサーはポリスチレン製のもので日本電気計器検定所で検定してその容量は $1.0072 \pm 0.0005 \times 10^{-8}\text{F}$ である。

実験に先立ちケーブル接続用の BNC コネクターの影響を調べるために、反対側にダミーステムを取りつけ電離電流の変化を求めたが、測定誤差の範囲内で検出できなかつたので一応この影響は無視した。

4. 測定方法および結果

4-1 セシウム-137ガンマ線の測定

電子線の実験に先立ち、セシウム-137よりのガンマ線を測定した。線源は日立製作所製の医療用セシウム-137固定照射装置で約2000Ciのセシウム-137を内蔵している。用いた熱量計はFig. 1に示したものと同じで1ユニットの熱量計の前後に5mm厚のグラファイト円板を連結したものである。測定部分の配置をFig. 4に示す。測定

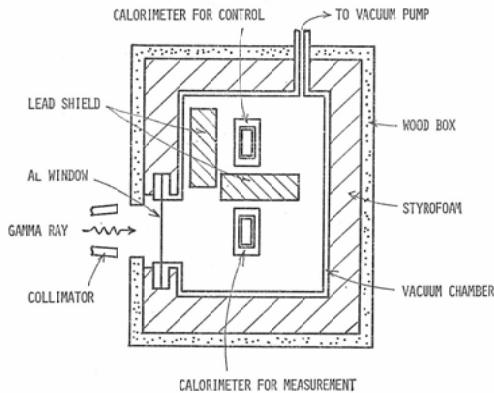


Fig. 4. Arrangement of apparatuses for calorimetric measurement.

用およびコントロール用熱量計は1cm厚のステンレススチール製真空箱内のルサイト台上に鉛隔壁をはさんで並べられている。真空箱は空気の対流および伝導による熱損失を防ぐため約 10^{-3} mmHgまで排気されており、更に箱全体は平均6cm厚の発泡ポリスチレンで包まれ木箱中に納められている。ただし放射線入射口は1mm厚のアルミニウム板のみである。線源より熱量計中心迄の距離は50.5cmで、その位置の照射野は $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 程度、線量率は約30R/minであった。電離箱はFig. 4の熱量計と同じ位置において空気単位体積あたりの電離を求めた。測定結果をTable 2に示す。空気のW値を $33.73 \pm 0.15 \text{ eV}$ として計算した空気とカーボンの質量阻止能比も併せて示してあるが、理論値¹⁰の1.010と良く一致している。

4-2 電子線の測定

電子線の測定もセシウムの場合と同じ配置で行

Table 2. The measured value with calorimeter and ionization chamber for Cs-137 gamma-rays and mean stopping power ratio of carbon to air calculated from them. The error of stopping power ratio includes the uncertainty in W which is $33.73 \pm 0.44\%$.

A. Calorimeter	B. Ionization chamber	A/B	Stopping power ratio, carbon to air
rads/min 26.0± 1.9%	esu/cc-min 29.6± 0.6%	$\frac{\text{rads}}{\text{esu/cc}}$ 0.878± 2.0%	$1.011 \pm$ 2.1%

なつた。ただし、ルサイト製のトランスマッショング型モニター電離箱を放射線入射口にあたるフランジの前面に取付け、熱量計および電離箱の測定値はモニターの読みに対し求めた。モニターの集電極の直径は熱量計の吸収体のそれとほぼ同じ大きさにし、両者を放射線錐の中心軸上に配置して測定中のビームのふらつきによるモニターに対する測定値の変化を防いだ。熱量計は3ユニットを連結し、同時に3個所の深さにおける線量を測定して位置による誤差を軽減するようにした。更に、前後にグラファイト円板を連結し種々の深さの線量を測定した。線源は東芝製のBMH-31型ベータトロンよりの電子線で、初期エネルギーが25MeVおよび15MeVの2種類を用いた。線量分布の平坦性を図るために25MeVでは0.5mmPb+0.5mmAlの、15MeVでは0.1mmPb+0.5mmAlのスキャタリングフォイルを用いた。SSDは102.8cm、この点の照射野は約 $8 \times 8 \text{ cm}^2$ である。電離箱は電離容積の前面と熱量計の吸収体の中央を同じ深さになるように配置して空気の単位体積あたりの電離を求めた。測定結果をFig. 5およびFig. 6ならびにTable 3およびTable 4に示す。Table 3およびTable 4の最後の欄にはセシウム-137の場合と同様に計算したカーボンと空気の質量阻止能比が示してある。

さて、单一エネルギーの電子線が媒質に入射した場合、そのエネルギーは深さと共に減少し又だんだん広いエネルギー分布を持つようになり、その質量阻止能比はエネルギースペクトルを考慮し

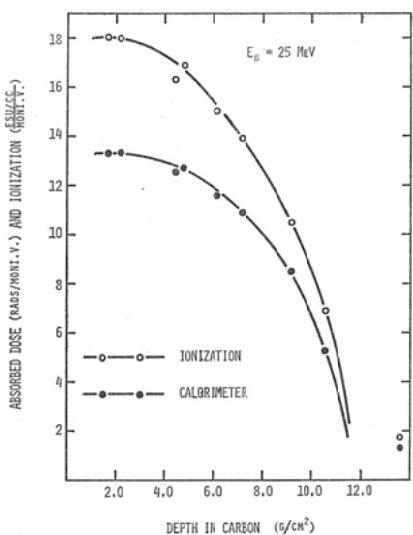


Fig. 5. Absorbed dose and ionization by depth in carbon for 25 MeV electrons.

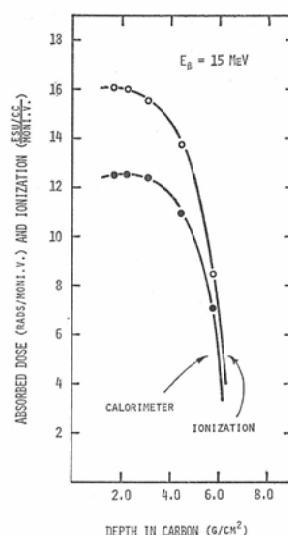


Fig. 6. Absorbed dose and ionization by depth in carbon for 15 MeV electrons.

た平均値を計算する必要がある。しかし、Harder⁹⁾は質量阻止能比はある深さにおける電子線の平均エネルギーに対して計算したもので充分表わされると述べている。その電子線の平均エネルギー E_m は式

$$E_m = E_0 (1 - d/R_p)$$

で与えられる。ここで E_0 は入射エネルギー、 d は深さ、 R_p は実効外挿飛程である。ベータトロンより射出する電子線はドーナツ壁とモニター電

離箱を通過する際にエネルギーを失い、25MeV では24.1MeV に、15MeV では14.1MeV となる¹²⁾。更に電子線はスキャタリングフォイルと運転制御用のモニター電離箱（1 mm厚ルサイトが2板）および1 mm厚アルミニウムの熱量計用真空箱の入射窓を通過する。Bergerの電子質量阻止能の計算値¹³⁾より各点のエネルギーの減衰を求め、熱量計に入射する時の電子線のエネルギーは25MeVの場合 22.14MeV、15MeVの場合 12.81MeV と

Table 3. The measured values with calorimeter and ionization chamber for 25MeV electrons, and the mean stopping power ratios of carbon to air calculated from them. The error of stopping power ratio includes the uncertainty in W which is $33.73 \pm 0.44\%$.

Depth in carbon	A. Calorimeter	B. Ionization chamber	A/B	Stopping power ratio, carbon to air
g/cm²	rads/moni. V.	esu/cc moni. V.	rads esu/cc	
1.70	$13.29 \pm 1.3\%$	$17.98 \pm 0.6\%$	$0.739 \pm 1.4\%$	$0.850 \pm 1.5\%$
2.21	$13.31 \pm 0.8\%$	$17.94 \pm 0.6\%$	$0.742 \pm 1.0\%$	$0.854 \pm 1.1\%$
4.42	$12.53 \pm 1.4\%$	$16.27 \pm 0.7\%$	$0.770 \pm 1.6\%$	$0.886 \pm 1.6\%$
4.76	$12.69 \pm 1.7\%$	$16.89 \pm 0.9\%$	$0.751 \pm 1.9\%$	$0.864 \pm 2.0\%$
6.12	$1.56 \pm 3.1\%$	$15.02 \pm 0.6\%$	$0.770 \pm 3.2\%$	$0.886 \pm 3.2\%$
7.14	$10.90 \pm 2.4\%$	$13.89 \pm 0.9\%$	$0.785 \pm 2.5\%$	$0.903 \pm 2.6\%$
9.18	$8.48 \pm 2.6\%$	$10.47 \pm 0.6\%$	$0.810 \pm 2.6\%$	$0.932 \pm 2.7\%$
10.54	$5.24 \pm 2.7\%$	$6.87 \pm 0.6\%$	$0.763 \pm 2.8\%$	$0.878 \pm 2.8\%$
13.60	$1.34 \pm 5.0\%$	$1.76 \pm 2.1\%$	$0.759 \pm 5.4\%$	$0.873 \pm 5.4\%$

Table 4. The measured values with calorimeter and ionization chamber for 15 MeV electrons, and the mean stopping power ratios of carbon to air calculated from them. The error of stopping power ratio includes the uncertainty in W which is $33.73 \pm 0.44\%$.

Depth in carbon g/cm ²	A. Calorimeter rads/moni. V.	B. Ionization chamber esu/cc moni. V.	A/B rads esu/cc	Stopping power ratio, carbon to air
1.70	$12.48 \pm 0.8\%$	$16.04 \pm 0.6\%$	$0.778 \pm 1.0\%$	$0.895 \pm 1.1\%$
2.21	$12.51 \pm 1.1\%$	$15.98 \pm 0.6\%$	$0.783 \pm 1.2\%$	$0.901 \pm 1.3\%$
3.06	$12.39 \pm 0.8\%$	$15.53 \pm 0.6\%$	$0.798 \pm 1.0\%$	$0.918 \pm 1.1\%$
4.42	$10.92 \pm 1.5\%$	$13.72 \pm 0.6\%$	$0.795 \pm 1.6\%$	$0.915 \pm 1.6\%$
5.78	$7.08 \pm 1.7\%$	$8.43 \pm 0.8\%$	$0.840 \pm 1.9\%$	$0.967 \pm 1.9\%$

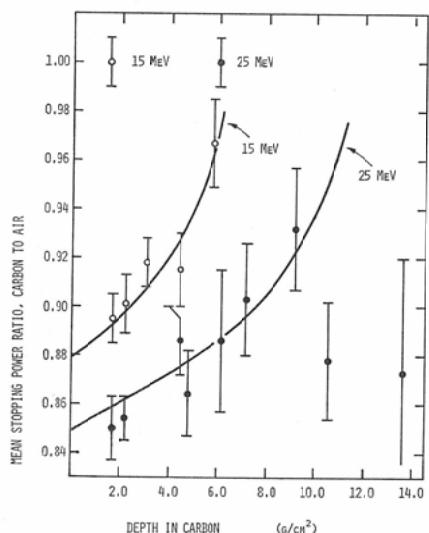


Fig. 7. Mean stopping power ratio, carbon to air, as a function of depth for 15 and 25 MeV electrons. The real lines show those calculated from Harder's formula.

なつた。これを E_0 とし Fig. 5 および 6 より R_p を求め Harder の式に代入して E_m を計算し、カーボンの空気に対する電子質量阻止能比を各深さに対し求めた。結果を Fig. 7 に実線で示す。更に、Fig. 7 には Table 3 および 4 の最後の欄にあるカーボンの空気に対する質量阻止能比の値も併せ示すが、25MeV の深部率曲線の末端のあたりを除き各点は測定誤差の範囲内で計算値と一致している。末端の不一致の部分は制動幅射線および熱量計と電離箱の測定位置の僅かのずれの影響を強く受けているものと思われる。

初期エネルギー15MeV の電子線を用いカーボンの約 2.0g/cm² の深さで同様の実験を行なつた Bradshaw⁵⁾ の報告では、空気単位体積中の単位電離当りの吸収線量として 0.768 ± 0.014 rads/esu/cc の値を得ている。本研究の値に較べやや小さいが、測定点における電子線の実効エネルギーが高いものと思われる。

5. 誤 差

Table 2, 3 および 4 に示した誤差は測定中における統計的な変動によるものと測定装置の組織誤差の両者を含んだものである。各組織誤差を Table 5 に示す。熱量計較正の際の電流測定は標

Table 5. Systematic errors in measurement of rads per esu/cc

Type of error	percent
Current measurement of calibration	0.11
Resistance measurement of calibration	0.05
Mass of absorber	0.08
Volume of ionization chamber	0.52
Calibration of capacitor	0.05
Pressure measurement	0.01
Temperature measurement	0.03
Voltage measurement of ionization chamber	0.05

準抵抗に電流を流しその電圧降下より求めるのであるが、標準抵抗の誤差が 0.005%，電圧計の確度が 0.05% である。更に、エネルギーの換算のため電流値は自乗するので電流測定の誤差は $2 \times (0.05 + 0.005) = 0.11\%$ となる。その他の電圧測定も differential voltmeter 又は digital voltmeter

によりその確度は0.05%以内である。抵抗測定はホイートストン・ブリッジを用いたが確度は0.05%以内である。ホイートストン・ブリッジは旧型計器で国際単位で表示してあるが、測定値は絶対単位に換算した。抵抗値の国際単位より絶対単位への換算係数は $1 / 1.00049$ とした¹⁵⁾。レコードーのトレースの再現性および読み取りの確度は測定の際の統計的誤差に含まれるとした。測定の全誤差はTable 5の組織誤差と熱量計の較正、熱量計による測定および電離箱による測定の際の標準偏差の3倍との自乗和の平方根となる。合計した全誤差は他報告¹¹⁾のものと1部を除きほぼ同等であつた。

6. 結論

カーボン（グラファイト）を用いて円筒型の熱量計および同型の平行平板型電離箱を作製した。測定した放射線はセシウム—137よりのガンマ線ならびにベータトロンよりの初期エネルギー15 MeVおよび25MeVの電子線である。熱量計は局所の吸収線量測定用のものであるので、電子線の場合、カーボン中の種々の深さにおける吸収線量を測定し、同位置における空気単位体積当りの電離と比較した。この比よりカーボンの空気に対する質量阻止能比を計算し、Harderの式より求めた各深さにおける電子線の平均エネルギーに対する質量阻止能比の理論値と比較したが実験誤差内で良く一致した。このことより、実際の電子線は入射した媒質中で広いエネルギー分布をもつであろうが、平均エネルギーに対する質量阻止能比を用いて電離箱等の測定値より媒質中の電子線の吸収線量が計算できると云えよう。セシウム—137のガンマ線の場合も質量阻止能比の実験値と理論値は良く一致した。

（本研究に当り、御指導、御討論を賜わった放医研物理研究部第2研究室松沢秀夫室長に深謝いたします。尚、本研究の要旨は第27回日本医学放射線学会で

発表した。）

文 献

- 1) Berger, M.J. and Seltzer, S.M.: Table of Energy Losses and Ranges of Electrons and Positrons. Studies in Penetration of Charged Particle in Matter, Publication 1133, National Academy of Sciences, Washington, D.C. (1964).
- 2) Bewley, D.K.: The measurement of locally absorbed dose of megavoltage X-rays by means of a carbon calorimeter. Brit. J. Radiol. **36** (1963) 865.
- 3) Bewley, D.K. et al.: Heat defect in tissue-equivalent radiation calorimeters. Phys. Med. Biol., Vol. 17, No. 1 (1972) 95.
- 4) Boag, J.W.: Ionization chambers in Radiation Dosimetry II. 1~72 (1966) Academic Press, Inc., New York, N.Y.
- 5) Bradshaw, A.L.: Calorimetric measurement of absorbed dose with 15 MeV electron. Phys. Med. Biol., Vol. 10, No. 3 (1965) 355.
- 6) Fleming, D.H. and Glass, W.A. Endothermic processes in tissue equivalent plastic. Rad. Res. **37** (1969) 316.
- 7) Gunn, S.R.: Radiometric calorimetry. Nucl. Instr. Meth. **29** (1964) 1.
- 8) Gunn, S.R.: Radiometric calorimetry. Nucl. Instr. Meth. **85** (1970) 285.
- 9) Harder, D.: Energiespectrum schneller elektronen in verschiedenen tiefen in Symposium on High Energy Electrons. (1965) 26~33, Springer-Verlag, Berlin, Germany.
- 10) ICRU Report 10b. Physical Aspect of Irradiation, NBS Handbook 85 (1962).
- 11) ICRU Report 14. Radiation Dosimetry (1969).
- 12) 稲田哲雄他：放射線の熱量的測定に関する研究（1），日本医放会誌，**21** (1961) 197。
- 13) 稲田哲雄，星野一雄：私信。
- 14) Petree, B. and Lamperti, P.: A comparison of absorbed dose determination in graphite by cavity ionization measurements and by calorimetry. J. Res. NBS **71C** No. 1 (1967) 19.
- 15) 理科年表 (1970), 物9, 丸善株式会社, 東京。
- 16) 佐方周防他：放射線の熱量的測定に関する研究（4），日本医放会誌，**24** (1964) 1105。
- 17) 高久祐治他：同上（2），ibid **21** (1961) 801。
- 18) 高久祐治他：同上（3），ibid **22** (1962) 316。